

## تحلیل بلور شناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) با شواهد هیپوژن و سوپرژن بر اساس مطالعات مقاطع صیقلی

عباس رحمانی<sup>۱</sup>، فرج‌الله فردوست

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود Abbas137901@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

### چکیده

کانسارهای اپی ترمال به دلیل تنوع کانی‌شناسی و پیچیدگی فرآیندهای کانه‌زایی، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی و اکتشافی برخوردارند. در این پژوهش، ویژگی‌های بلورشناسی، کانی‌شناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی ترمال فلدسپات واقع در شمال غرب سطوه، در جنوب نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه شیرین با هدف تفکیک فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های مورد مطالعه شامل مجموعه‌ای از نمونه‌های سطحی و نمونه‌های برداشت‌شده از گمانه‌های اکتشافی بوده که هر دو زون هیپوژن و سوپرژن را پوشش می‌دهند. به منظور انجام مطالعات، ۲۰ مقطع صیقلی و نازک-صیقلی تهیه شد که از میان آن‌ها ۸ نمونه شاخص برای بررسی‌های تفصیلی انتخاب گردید. مطالعات میکروسکوپی و آنالیزهای شیمیایی (ICP-OES, XRD) نشان‌دهنده حضور کانی‌های سولفیدی و ثانویه‌ای نظیر پیریت، کالکوپیریت، گالن، کالکوسیت، کولین، مالاکیت، گوتیت و همتیت است. بافت‌های متنوعی شامل رگه-رگچه‌ای، دیسپیمینه، نواری سولفیدی-سیلیسی، پرشدگی فضاهای خالی (سیمان‌شدگی) و بافت‌های برشی در نمونه‌ها مشاهده شد که بیانگر کانه‌زایی چندمرحله‌ای در منطقه می‌باشد. پیریت‌های خودشکل مکعبی که گالن را قطع می‌کنند، همراه با کالکوپیریت اولیه، معرف مرحله هیپوژن کانه‌زایی هستند که همزمان با دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی در سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی و سندی توف تشکیل شده‌اند. در مقابل، حضور کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، رگه-رگچه‌های مالاکیت و پرشدگی شکستگی‌ها توسط گوتیت و همتیت، شواهد روشنی از فرآیندهای سوپرژن و غنی‌شدگی ثانویه مس را ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اپی ترمال، پیریت، کالکوپیریت، گالن، سوپرژن، هیپوژن

## Crystallographic and Textural Analysis of Sulfide Minerals in the Feldspat Epithermal Deposit (Northwest of Satveh) Based on Polished Section Studies with Evidence of Hypogene and Supergene Processes

Abbas Rahmani<sup>1</sup>; Farajollah Fardoost<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc Student in Economic Geology, Shahrood University of Technology, Abbas137901@gmail.com

<sup>2</sup> Ph.D in Economic Geology-Geochemistry, Moscow State University, Associate Professor, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology

### Abstract

Epithermal deposits are of particular importance in economic geology and mineral exploration studies due to their mineralogical diversity and the complexity of ore-forming processes. In this study, the crystallographic, mineralogical, and textural characteristics of sulfide minerals in the Feldspat epithermal deposit, located northwest of Sotveh in the southern part of the Torud-Chah Shirin volcanic-sedimentary belt, were investigated with the aim of distinguishing hypogene and supergene processes. The studied samples include a combination of surface samples and drill core samples, covering both hypogene and supergene mineralization zones. For this purpose, a total of 20 polished and polished thin sections were prepared, from which eight representative samples were

selected for detailed investigations. Microscopic studies and geochemical analyses (ICP-OES and XRD) indicate the presence of sulfide and secondary minerals including pyrite, chalcopyrite, galena, chalcocite, covellite, malachite, goethite, and hematite. Various ore textures such as vein-veinlet, disseminated, sulfide-siliceous banded, open-space filling (cementation), and brecciated textures were identified, reflecting a multistage mineralization history in the study area. Euhedral cubic pyrite crystals cutting galena, together with primary chalcopyrite, represent the hypogene stage of mineralization, which formed contemporaneously with silicic and argillic alterations within rhyolitic to rhyodacitic and sandy tuff host rocks. In contrast, the occurrence of chalcocite, bladed covellite, malachite veinlets, and the infilling of fractures by goethite and hematite provide clear evidence for supergene processes and secondary copper enrichment.

**Keywords:** Epithermal, Pyrite, Chalcopyrite, Galena, supergene, hypogene

## ۱- مقدمه

کانسارهای اپی‌ترمال یکی از مهم‌ترین انواع کانسارهای فلزی به‌ویژه از نظر تمرکز عناصر طلا، مس، سرب، روی و فلزات گران‌بها محسوب می‌شوند و به دلیل ارتباط مستقیم با فعالیت‌های هیدروترمال کم‌عمق، از پیچیدگی‌های کانی‌شناسی و بلورشناسی قابل توجهی برخوردارند (White and Hedenquist, 1995; Corbet and Leach, 1997). در این کانسارها، تغییرات فیزیکوشیمیایی سیالات کانه‌دار در طی مراحل مختلف زمین‌زایی، منجر به تشکیل مجموعه‌ای متنوع از کانی‌های سولفیدی شده و فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن نقش اساسی در تکامل کانه‌زایی ایفا می‌کنند. مطالعات بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای بازسازی توالی تبلور، تشخیص نسل‌های مختلف کانی‌سازی و تفکیک فرآیندهای اولیه (هیپوژن) از دگرسانی‌ها و کانه‌زایی‌های ثانویه (سوپرژن) به شمار می‌رود (Craig and Vaughan, 1994). بررسی روابط پاراژنتیکی، بافت‌های جانشینی، روابط برشی و ویژگی‌های نوری کانی‌ها در مقاطع صیقلی، اطلاعات ارزشمندی درباره شرایط تشکیل کانسار و تحولات پس از آن فراهم می‌سازد (Barton and Bethke, 1987). افزون بر این، به‌کارگیری آنالیزهای شیمیایی می‌تواند در تفسیر دقیق‌تر منشأ کانی‌ها و روندهای دگرسانی و سوپرژن مؤثر واقع شود (Reed, 1997). کانسار اپی‌ترمال فلدسپات واقع در شمال غرب سطوه، در استان سمنان و در جنوب نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین در شمال ایران مرکزی (آق‌آبانی، ۱۳۸۳، علوی ۱۳۷۵) با حضور کانی‌های سولفیدی متنوعی نظیر پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت و گالن، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه همزمان فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن به شمار می‌رود. با وجود اهمیت این کانسار، تاکنون مطالعات جامعی با تمرکز بر ویژگی‌های بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی و ارتباط آن‌ها با مراحل مختلف کانه‌زایی در این منطقه انجام نشده است. هدف از این پژوهش، تحلیل بلورشناسی و بافتی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات بر اساس مطالعات مقاطع صیقلی و آنالیزهای شیمیایی، به‌منظور شناسایی توالی پاراژنتیکی و تفکیک شواهد هیپوژن و سوپرژن است. نتایج این مطالعه می‌تواند علاوه بر افزایش شناخت زمین‌شناسی کانسار، در تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و کاربردهای اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه مؤثر واقع شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نمونه‌های مورد مطالعه به‌صورت ترکیبی از نمونه‌های سطحی و نمونه‌های برداشت‌شده از گمانه‌های اکتشافی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) جمع‌آوری شدند. نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انجام شد که هر دو زون کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن به‌خوبی پوشش داده شود. مجموعه نمونه‌ها شامل کانی‌های سولفیدی و اکسیدی متنوعی از جمله کالکوسیت، کولین، مالاکیت، گوتیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت و گالن است که نشان‌دهنده چندمرحله‌ای بودن فرآیندهای کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌منظور انجام مطالعات کانی‌شناسی، بلورشناسی و بافتی، در مجموع ۲۰ مقطع شامل مقاطع

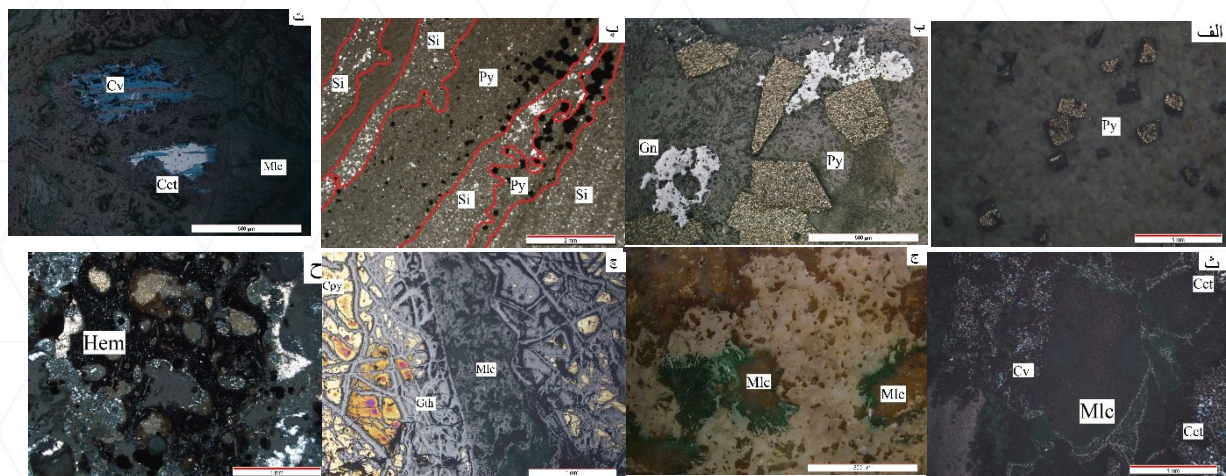
صیقلی کانه‌ای و مقاطع نازک-صیقلی از نمونه‌های منتخب تهیه شد. از میان این مجموعه، ۸ نمونه (GFA-08-1, GFA-08-۲, BHF2-79-1, BHF4-189-1, BHF8-1, BHF14-22-1, BHF14-22-3, GFA-01) شاخص بر اساس تنوع کانی‌شناسی، موقعیت در زون‌های مختلف کانه‌زایی و کیفیت بافت‌های بلوری برای مطالعات تفصیلی انتخاب گردیدند. مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع صیقلی با استفاده از میکروسکوپ نور بازتابی انجام شد و ویژگی‌های نوری، شکل بلورها، اندازه دانه‌ها و روابط فضایی کانی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مقاطع نازک-صیقلی نیز علاوه بر بررسی کانی‌های سولفیدی، ارتباط آن‌ها با کانی‌های اکسیدی و سنگ میزبان مورد توجه قرار گرفت. شناسایی کانی‌ها و تشخیص نسل‌های مختلف کانه‌زایی بر اساس ویژگی‌های نوری، بافتی، روابط برشی و شواهد جانشینی صورت پذیرفت. به‌منظور تکمیل مطالعات میکروسکوپی و تأیید نتایج کانی‌شناسی، آنالیزهای شیمیایی بر روی نمونه‌های منتخب انجام شد. داده‌های حاصل از این آنالیزها در کنار شواهد بافتی و بلورشناسی، برای تفکیک فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن و تفسیر توالی پاراژنتیکی کانی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳- بحث

بررسی بلورشناسی، بافتی و روابط پاراژنتیکی کانی‌های سولفیدی در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات نشان‌دهنده کانه‌زایی چندمرحله‌ای و تأثیر هم‌زمان فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن است. حضور بافت‌های متنوعی نظیر رگه-رگچه‌ای، دیسیمینه، نواری سولفیدی-سیلیسی، پرشدگی فضاهای خالی (سیمان‌شدگی) و بافت‌های برشی، بیانگر نقش ساختارهای تکتونیکی و مسیرهای نفوذ سیالات هیدروترمال در کنترل کانه‌زایی منطقه می‌باشد. چنین مجموعه‌ای از بافت‌ها به‌طور گسترده در کانسارهای اپی‌ترمال گزارش شده و معرف رسوب‌گذاری کانی‌ها در اعماق کم و تحت نوسانات فشار-دما است (White & Hedenquist, 1995; Corbett & Leach, 1997). وجود پیریت‌های خودشکل با بلورهای مکعبی و بافت دیسیمینه در سنگ میزبان، که شامل ریولیت تا ریوداسیت‌های سیلیسی‌شده و واحدهای سندی‌توف می‌باشد، نشان‌دهنده مرحله اولیه کانه‌زایی هیپوژن است. این پیریت‌ها احتمالاً هم‌زمان با دگرسانی سیلیسی و ارژلیکی و در اثر گردش سیالات هیدروترمال اسیدی تا خنثی تشکیل شده‌اند. شکل‌دار بودن بلورها و عدم شواهد جانشینی گسترده در این مرحله، مؤید تبلور اولیه در شرایط نسبتاً پایدار فیزیکوشیمیایی سیال است (Craig & Vaughan, 1994). وجود پیریت‌های خودشکل با بلورهای مکعبی که به‌طور واضح کانی گالن را قطع می‌کنند، نشان‌دهنده تبلور پیریت در مرحله‌ای دیرتر نسبت به گالن است و احتمالاً در ادامه تکامل سامانه هیپوژن است. این رابطه برشی بیانگر چندمرحله‌ای بودن کانه‌زایی هیپوژن بوده و نشان می‌دهد که پس از رسوب اولیه گالن، شرایط فیزیکوشیمیایی سیال هیدروترمال دچار تغییر شده و زمینه برای تبلور مجدد پیریت فراهم شده است. شکل‌دار بودن بلورهای پیریت و رشد آن‌ها در امتداد شکستگی‌ها و فضاهای خالی، مؤید تبلور در مرحله‌ای متأخرتر و تحت شرایط نسبتاً پایدارتر نسبت به مرحله تشکیل گالن می‌باشد (Craig & Vaughan, 1994; Corbett & Leach, 1997). این توالی پاراژنتیکی که در آن پیریت متأخرتر از گالن تشکیل شده است، در برخی از سامانه‌های اپی‌ترمال گزارش شده و معمولاً با تغییر ترکیب شیمیایی سیالات، افزایش نسبت گوگرد و نوسانات شرایط اکسایش-کاهش همراه است (Hedenquist et al., 2000). چنین شواهدی نقش مهم مطالعات بلورشناسی و روابط برشی را در بازسازی تاریخچه کانه‌زایی کانسارهای اپی‌ترمال برجسته می‌سازد. شواهد قوی سوپرژن در کانسار مورد مطالعه شامل حضور کالکوسیت، کولین تیغه‌ای درون کالکوسیت، رگه-رگچه‌های مالاکیت و پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت است. بافت تیغه‌ای کولین در کالکوسیت و جانشینی کانی‌های اولیه مس‌دار، نشان‌دهنده شرایط اکسیدان و غنی از آب‌های سطحی در مرحله سوپرژن می‌باشد. چنین بافت‌هایی معمولاً در زون‌های اکسیداسیون و غنی‌شدگی ثانویه کانسارهای اپی‌ترمال گزارش شده و معرف بازتوزیع مس در اثر نفوذ آب‌های جوی است (Sillitoe, 2005; Reich et al., 2013). پرشدگی فضاهای خالی و شکستگی‌ها توسط گوتیت و هماتیت، همراه با دگرسانی هماتیتی و کربناتی، بیانگر نقش فرآیندهای پس‌رسوبی و اکسیداسیون شدید در بخش‌های بالایی کانسار است. این ویژگی‌ها، در کنار دگرسانی ارژلیکی و سیلیسی گسترده، با الگوی کلاسیک کانسارهای اپی‌ترمال سازگار بوده و نشان می‌دهد که سیالات



هیدروترمال اولیه پس از صعود و سرد شدن، تحت تأثیر شرایط سطحی دچار تغییرات شیمیایی قابل توجهی شده‌اند (Hedenquist et al., 2000). در مجموع، ترکیب شواهد بلورشناسی، بافتی و پاراژنتیکی نشان می‌دهد که کانسار اپی‌ترمال فلدسپات حاصل برهم‌کنش یک سامانه هیپوژن اولیه، کنترل شده توسط ساختارها و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، و یک مرحله سوپرژن متأخر است که منجر به غنی‌شدگی ثانویه مس و تشکیل کانی‌های اکسیدی و کربناتی شده است. این نتایج اهمیت مطالعات بلورشناسی و کانی‌شناسی دقیق را در تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و کاربردهای اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه نشان می‌دهد. تفکیک زون‌های هیپوژن و سوپرژن در کانسار اپی‌ترمال فلدسپات بر اساس مجموعه‌ای از شواهد بلورشناسی، بافتی و کانی‌شناسی انجام شد. زون هیپوژن عمدتاً با حضور پیریت‌های خودشکل مکعبی و گالن، همراه با بافت‌های دیسیمینه، نواری سولفیدی-سیلیسی و رگه‌ای مشخص می‌شود که بیانگر تبلور کانی‌ها از سیالات هیدروترمال اولیه در شرایط دمایی و فشاری بالاتر است. این کانی‌ها اغلب در ارتباط مستقیم با سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی سیلیسی شده و دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی تشکیل شده‌اند که ویژگی‌های شاخص سامانه‌های اپی‌ترمال هیپوژن محسوب می‌شوند (White & Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000). در مقابل، زون سوپرژن با حضور کانی‌های ثانویه نظیر کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، مالاکیت، گوتیت و هماتیت، به همراه بافت‌های جانشینی، پرشدگی شکستگی‌ها و سیمان‌شدگی فضاهای خالی شناخته می‌شود. جانشینی کانی‌های اولیه مس‌دار توسط کالکوسیت و تشکیل رگه-رگچه‌های مالاکیت، نشان‌دهنده نفوذ آب‌های سطحی اکسیدان و غنی‌شدگی از  $CO_2$  در بخش‌های بالایی کانسار است. همچنین پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت و توسعه دگرسانی هماتیتی و کربناتی، مؤید شدت فرآیندهای اکسیداسیون و غنی‌شدگی ثانویه در زون سوپرژن می‌باشد. این مجموعه شواهد با الگوهای کلاسیک تفکیک زون‌های سوپرژن و هیپوژن در کانسارهای اپی‌ترمال مشاهده گردیده است (Sillitoe, 2005; Reich et al., 2013).



شکل ۱- الف) بلورهای پیریت (Py) و بافت دیسیمینه (BHF14-22-1) ب) قطع شدن گالن (Gn) توسط پیریت (BHF4-189) 1) پ) بافت نواری سولفیدی-سیلیسی (Si) (BHF8-1) ت) کالکوسیت (Cct) ثانویه و تیغه‌های کولین (Cv) (GFA-08-1) ث) رگه-رگچه‌های مالاکیت (Mlc) به همراه کالکوسیت و کولین سوپرژن (BHF2-79-1) ج) رگچه‌های مالاکیت (BHF14-22-3) چ) بافت برشی در کالکوپیریت (Cpy) با گوتیت (Gth) (GFA-08-2) ح) سیمان هماتیتی (Hem) (GFA-01)

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های بلورشناسی، کانی‌شناسی و بافتی انجام شده بر روی مقاطع صیقلی و نازک-صیقلی کانسار اپی‌ترمال فلدسپات (شمال غرب سطوه) نشان می‌دهد که کانه‌زایی در این منطقه ماهیتی چندمرحله‌ای داشته و حاصل برهم‌کنش فرآیندهای هیپوژن و سوپرژن است. حضور پیریت‌های خودشکل مکعبی، کالکوپیریت اولیه و گالن، همراه با بافت‌های دیسیمینه، نواری

سولفیدی-سیلیسی و رگه‌ای، معرف مرحله هیپوژن کانه‌زایی و تبلور کانی‌ها از سیالات هیدروترمال اولیه در ارتباط با سنگ‌های میزبان ریولیتی تا ریوداسیتی سیلیسی‌شده و سندی‌توف می‌باشد. در مقابل، توسعه کانی‌های ثانویه‌ای نظیر کالکوسیت، کولین تیغه‌ای، مالاکیت، گوتیت و هماتیت، به همراه بافت‌های جان‌شینی، پرشدگی شکستگی‌ها و سیمان‌شدگی فضاهای خالی، شواهد روشنی از فعالیت فرآیندهای سوپرژن و غنی‌شدگی ثانویه عناصر فلزی به‌ویژه مس را ارائه می‌دهد. روابط برشی میان کانی‌ها، به‌ویژه قطع‌شدن گالن توسط پیریت و پرشدگی فضاهای بین کالکوپیریت‌های برشی توسط گوتیت، نقش مهم ساختارها و شکستگی‌ها را در کنترل مسیر حرکت سیالات و تمرکز کانی‌سازی نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که مطالعات دقیق بلورشناسی و بافتی، در کنار آنالیزهای شیمیایی، ابزاری کارآمد برای بازسازی توالی پاراژنتیکی و تفکیک زون‌های هیپوژن و سوپرژن در کانسارهای اپی‌ترمال است. یافته‌های حاصل می‌تواند به‌عنوان مبنایی مناسب برای تفسیر فرآیندهای کانه‌زایی و برنامه‌ریزی‌های اکتشافی در کانسارهای اپی‌ترمال مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت زرکاوان کیان به‌دلیل حمایت‌های فنی و فراهم‌سازی شرایط مناسب جهت انجام مطالعات میدانی و نمونه‌برداری صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از افراد و کارشناسان محترم معدن گندی که با همکاری و راهنمایی‌های ارزشمند خود در مراحل مختلف برداشت نمونه‌ها و بازدیدهای صحرایی نقش مؤثری ایفا کردند، کمال تشکر و امتنان به‌عمل می‌آید.

#### ۶- مراجع

- آقاباتی، س.ع، 1383. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
- علوی، م.، ۱۳۷۵. تکتونیک ایران مرکزی و نوارهای ساختاری وابسته. فصلنامه علوم زمین، ۵(۲)، ۲۸-۱.
- Barton, P. B., Bethke, P. M., 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. *American Mineralogist*, 72, 451-467.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M., 1997. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. Society of Economic Geologists Special Publication.
- Craig, J. R., & Vaughan, D. J., 1994. Ore Microscopy and Ore Petrography.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245-277.
- Reich, M., et al., 2013. Supergene enrichment processes in copper deposits. *Economic Geology*, 108, 1471-1488.
- Sillitoe, R. H., 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. *Economic Geology*, 100, 1649-1661.
- John Wiley & Sons. Reed, M. H., 1997. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. *Reviews in Economic Geology*, 10, 303-365
- White, N. C., & Hedenquist, J. W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 23, 1-13.